亚寒带荒漠草原不同树种人工林土壤生态化学计量特征

娄泊远[1,2,3]， 王永东[1,3]， 闫晋升[1,2,3]， 艾柯代·艾斯凯尔[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 101408；
3. 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：为了阐明亚寒带荒漠草原不同树种人工林间土壤养分含量及生态化学计量特征的差异，通过野外调查与室内分析相结合的方法，在哈萨克斯坦首都努尔苏丹选取种植白桦、樟子松、梣叶槭3种不同树种，林龄为11 a的亚寒带荒漠草原人工林为研究对象，以裸地为对照，对其土壤养分含量及其生态化学计量特征进行了分析。结果表明：(1) 土壤养分含量受树种的影响，但不同树种间生态化学计量特征差异不显著。(2) 种植人工林后，不同树种人工林土壤有机碳与全氮含量均显著增加，针叶林与阔叶林土壤表层有机C、全N含量差异显著。(3) 土壤C、N、P含量呈极显著正相关关系，C含量是C:N、C:P的控制因子，N含量是N:P的控制因子。研究区种植人工林后，虽然土壤养分含量显著增加，但是总体含量仍小于全球平均水平，当地土壤养分仍处于匮乏状态。N是该地区养分循环和植物生长的限制性因素，在人工林生长过程中适当施用氮肥，可加快人工林生长和生态恢复进程。本研究可为哈萨克斯坦首都努尔苏丹的人工林建设和持续经营管理提供科学依据。

关键词：土壤；荒漠草原；生态化学计量；土壤养分；哈萨克斯坦

土壤是生态系统的重要组成部分之一，也是植物生长所需的主要养分来源[1]。C、N、P作为土壤养分中植物生长发育所需的大量元素，是土壤质量评价中的重要指标，主要受气候、地形、植被、土壤母质、土壤动物及微生物的影响[2]，其含量及动态平衡直接影响着凋落物的分解速率以及植物的生长，进而影响生态系统的生产力。生态化学计量学是研究生态系统能量平衡和化学元素平衡的科学[3]。近年来，其作为一门新兴学科在国内迅速发展，主要集中在区域C:N:P生态化学计量特征及驱动因素方面，以森林和草原生态系统的研究较多[4-7]。探究森林生态系统中土壤的生态化学计量特征，对认识森林土壤元素循环过程、养分限制关系，实现森林的生态服务功能和可持续经营具有重要的作用[8-11]。

森林土壤C、N、P、K含量之间存在密切关系，受成土因素、植被类型和人类活动影响，其比值能够反应土壤的元素循环和养分平衡特征[12-13]。不同的植物类型对土壤元素的吸收利用率不同，从而导致土壤的生态化学计量特征存在差异性。俞月凤等[14]研究发现，西南喀斯特峰从洼地不同森林类型土壤C、N、P含量均存在显著差异。李茜[15]在陕西子午岭研究发现，树种主要影响土壤C含量，油松林土壤的C含量及C:N、C:P显著低于辽东栎，树种对土壤P含量无显著影响。气候类型通过改变区域水热状况从而改变土壤生态化学计量特征，大尺度上，随着纬度的增高，植物叶片的C、N、P含量显著增加而N:P却减少[16-18]。广西喀斯特生态系统不同植被类型下的土壤C:P、N:P平均值均显著高于黄土高原生态系统[19-20]。李路等[21]指出，湿热地区土壤C、N含量较高，但由于淋溶导致土壤P流失。由此可见，不同地区不同气候类型的人工林生态系统，土壤元素及生态化学计量特征表现出显著的差异性，这种差异来源于区域气候，植被生物学特性和人工林经营方式[12-22]。对生态化学计量特征的研究，可以揭示

收稿日期：2021-02-04； **修订日期：**2021-06-30
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20030102)；中国科学院关键技术人才项目("一带一路"荒漠化防治技术模式研究)
作者简介：娄泊远(1995-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持和荒漠化防治相关研究. E-mail: louboyuan18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：王永东. E-mail: wangyd@ms.xjb.ac.cn

人工林生长过程中的养分限制和养分循环过程，因此，在特定地区和生态系统开展土壤生态化学计量特征研究十分重要。

哈萨克斯坦地处欧亚大陆腹地，首都努尔苏丹位于其国土中北部的荒漠草原地带，是哈萨克斯坦全国的铁路交通枢纽和工农业主要生产基地。当地属于典型的大陆性气候，夏季干燥炎热，冬季寒冷漫长，大风天气频繁。恶劣的气候给努尔苏丹居民的生产生活和生态建设带来了极大的不便，这不仅影响努尔苏丹的经济社会发展，而且也严重降低了其作为首都的吸引力。自1997年起，哈萨克斯坦政府启动了绿环工程，通过20 a的努力，在首都周边营造了约6.67×10^4 hm^2的人工林，为首都的生态环境改善发挥了作用。但高海拔寒冷地区造林面临自然环境恶劣，植物生长缓慢，生态稳定度低等问题[23]。目前，针对当地人工林土壤的C、N、P、K储量及生态化学计量特征研究较少，对人工林建设过程中土壤质量的变化不够了解，不利于人工林的后续建设和科学管理。因此，本研究以努尔苏丹城市外围人工林为研究对象，以未造林裸地为对照，研究分析不同林分类型人工林下土壤C、N、P、K储量及生态化学计量特征，以期揭示不同林分类型人工林对土壤质量演变过程与生态化学计量特征的影响，为哈萨克斯坦首都努尔苏丹的人工林建设和持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于哈萨克斯坦首都努尔苏丹(51.1°N，71.5°E)，地处欧亚大陆腹地，哈萨克斯坦北部。属于亚寒带地区荒漠草原，地形平坦，海拔为349~442 m。属于极端大陆性气候区，冬冷夏热，夏季最高温度可达35 ℃，冬季温度则低至-52 ℃。年均降水量仅300 mm，且年内分布不均，春季占30%，秋冬季占36%；常年盛行西南风，而且大风天气频繁，每年沙尘天气约30 d左右。土壤类型以栗钙土为主，伴有部分夹石、碱化、石灰性等劣质土，土壤下层存在坚硬紧实的钙积层。原始植被类型以草原为主，伴有少量天然森林。

1.2 土壤样品采集

2019年8—9月，在研究区选取土壤类型一致的白桦(*Betula platyphylla*)纯林、樟子松(*Pinus sylvestris*)纯林、梣叶槭(*Acer negundo*)纯林3个不同树种，林龄均为11 a的人工林为研究对象，并选择林外典型裸地为对照，位置如表1所示。在林内随机选取3个点设置样方挖取剖面，去除土层上枯落物，按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm3个深度分层采取3次土壤样品，相同样点同一深度土壤混合后按四分法取约1 kg装入自封袋；用环刀取样，用于测定土壤容重。共采取36个土壤样品，带回实验室。并记录样地的经纬度、地形地貌、植被生长情况等。土壤样品在自然条件下自然风干，去除枯落物、植物根系、砾石等杂物后研磨，过0.149 mm筛备用，用于实验室测定分析土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量。

表1 样地概况

Tab. 1 Basic situations of sampling plot

林分类型	林龄/a	经纬度
白桦	11	51°14′15.15″N，71°43′27.51″E
樟子松纯林	11	51°12′03.02″N，71°41′53.49″E
梣叶槭纯林	11	51°11′31.71″N，71°39′26.49″E
CK	-	51°09′11.08″N，71°40′4.81″E

1.3 测定项目与方法

有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量——外加热法测定;全氮(TN)采用高氯酸——硫酸消化法，福斯1035全自动定氮仪测定;全磷(TP)采用酸溶——钼锑抗比色法，安捷伦CARY60紫外分光光度计测定;全钾(TK)采用酸溶——原子吸收法，赛默飞S系列原子吸收光谱仪测定[24]。

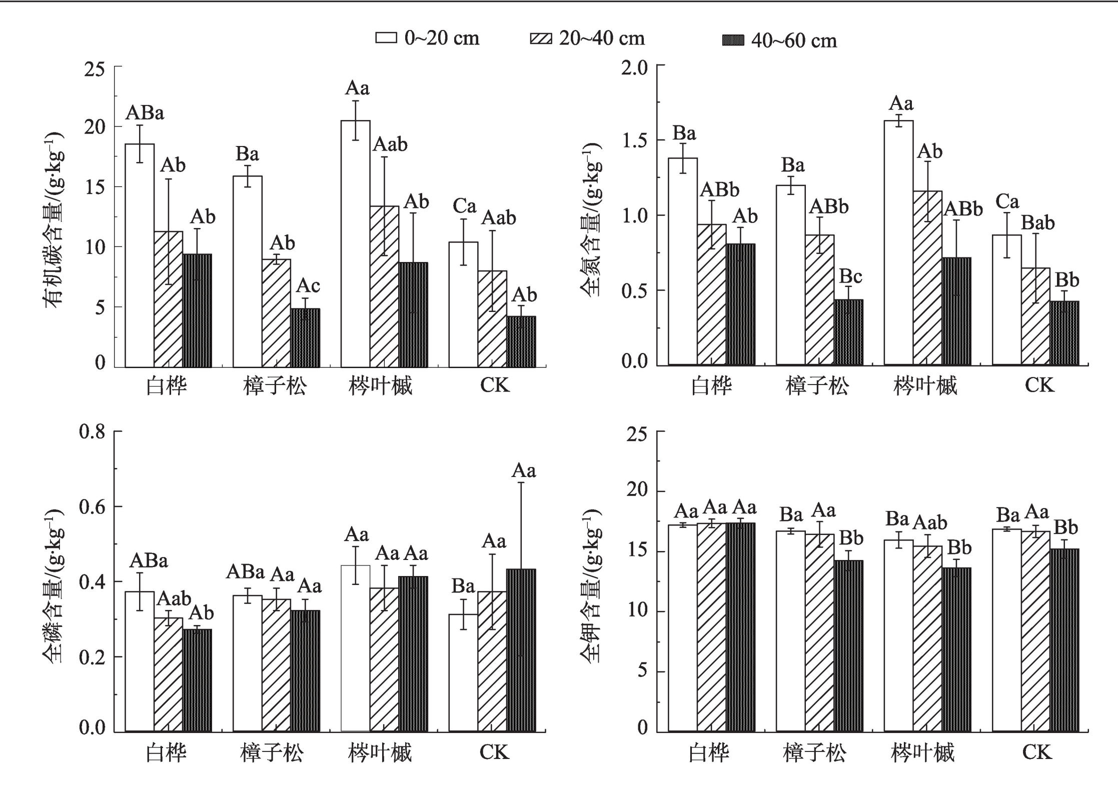
1.4 数据处理

使用Excel和SPSS软件对数据进行统计分析。运用单因素方差分析(one way ANOWA)检验林分类型对于土壤C、N、P、K含量以及生态化学计量特征的影响，不同林分类型间土壤差异用Duncan进行多重比较。运用Pearson相关分析检验土壤养分含量与其生态化学计量特征间的相关性。使用Origin软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤C、N、P、K含量

由图1所示，0~20 cm土层，梣叶槭人工林土壤有机碳、全氮含量显著高于樟子松人工林和对照组($P<0.05$)。与裸地相比，白桦林地的有机碳和全N含量分别增加了78.6%、59.3%，樟子松林地分别增



注:不同大写字母代表同一土层不同树种间差异显著,不同小写字母代表同一树种不同土层间差异显著(P<0.05)。

图1　不同树种土壤有机C、全N、全P、全K含量

Fig. 1　Soil TC, TN, TP content in different tree spcies

加了52.8%、38.4%,柃叶槭林地分别增加了97.3%、88.4%。与对照组裸地相比,人工林的种植能够显著提高土壤养分含量。

不同树种表层土壤全P含量差异不显著,白桦林地全K含量显著高于樟子松林和柃叶槭林。20~40 cm土层,不同树种间土壤有机碳、全N、全P、全K含量差异均不显著。40~60 cm土层,除白桦土壤全N、全K含量显著高于其他树种外,不同树种间有机碳、全P含量差异均不显著。研究区土壤养分含量随土层深度增加呈降低的趋势。3种树种人工林土壤表层有机C、全N、全K含量均显著高于深层土壤,而全P含量在垂直梯度上的变化并不显著。

2.2　土壤生态化学计量特征

由表2可见,不同树种人工林土壤C:N变化范

表2　土壤生态化学计量特征

Tab. 2　Characteristics of soil ecological stoichiometry

土层/cm	树种	C:N	C:P	N:P
0~20	白桦	13.5±0.6Aa	49.81±3.09Aa	3.69±0.19Aa
	樟子松	13.32±0.33ABa	44.32±1.52Aa	3.33±0.03Aa
	柃叶槭	12.62±0.73ABa	46.77±2.02Aa	3.72±0.36Aa
	CK	12.09±0.32Ba	33.3±2.87Ba	2.75±0.18Ba
20~40	白桦	11.67±2.36Aa	36.36±11.47Aa	3.05±0.33Aab
	樟子松	10.6±1.33Aa	25.73±1Ab	2.46±0.31Ab
	柃叶槭	11.42±1.6Aa	34.75±5.15Aab	3.04±0.24Aa
	CK	12.05±2.87Aa	21.2±7.63Aab	1.7±0.26Bb
40~60	白桦	11.64±1.44Aa	34.04±6.66Aa	2.9±0.3Ab
	樟子松	11.51±1.85Aa	15.86±4.52Bc	1.39±0.41Bc
	柃叶槭	11.69±1.33Aa	20.78±8.98ABb	1.72±0.53Bb
	CK	10.22±1.83Aa	12.88±6.69Bb	1.3±0.62Bb

注:不同大写字母表示同一土层不同树种间差异显著,不同小写字母表示同一树种不同深度差异显著(P<0.05)。

围为10.22~13.5,不同树种间土壤表层C:N无显著差异,且均显著高于对照组裸地,20~60 cm土层,各样地间差异均不显著。C:P变化范围为12.88~49.81,3个树种表层土壤C:P均高于对照裸地,40~60 cm土层,白桦、桤叶槭土壤C:P显著高于樟子松。N:P变化范围为1.3~3.72,0~40 cm土层,不同树种间N:P差异不显著且均显著高于对照组,40~60 cm深度,白桦林土壤N:P显著高于樟子松和桤叶槭。

不同土层全P含量稳定,土壤有机C、全N随着深度增加有减少的趋势,所以3个不同树种土壤C:P、N:P随着土层深度增加呈显著降低趋势($P<0.05$)。相同树种不同深度土层间C:N不存在显著差异。

2.3 土壤养分含量及生态化学计量比之间的相关性

由表3可见,有机碳与全氮含量及碳氮磷化学计量特征之间具有极显著正相关性($P<0.01$),全氮与有机碳及碳氮磷化学计量特征之间具有极显著正相关性($P<0.01$),全磷与有机碳、全氮之间具有极显著正相关性($P<0.01$),全钾与有机碳、全氮、显著相关($P<0.05$),与C:P、N:P极显著相关($P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 不同树种对土壤C、N、P、K含量的影响

土壤C、N、P、K含量是土壤的主要肥力指标[25]。0~20 cm土层,不同树种人工林土壤有机碳、全N含量差异显著,阔叶林(白桦)土壤有机碳、全N含量显著高于针叶林(樟子松),与前人的研究结果一致,这可能是由于凋落物数量和化学组成不同造成的,树种不同,地上地下凋落物的数量存在差异,从而影响土壤C、N含量[26]。也有研究表明,阔叶林土壤表层有机碳含量高于针叶林[27]。本研究中土壤有机碳、全N含量随着土壤深度增加呈显著降低趋势,而全P、全K含量降低较小且不显著,这与张向茹等[28]的研究结果一致。这是由于土壤有机碳和全N的主要来源为地表凋落物、动物残体等有机质转化积累,而且土壤90%的生物量集中在土壤表层,因此土壤表层有机质和全氮含量最高[29]。深层的土壤有机C和全N主要是源于水的淋溶作用在土壤中的扩散迁移,因此在垂直尺度上存在较大的空间变异性。土壤P的获得方式是岩石风化,与母质有关,是一个漫长稳定的过程,不易受外界的影响[30]。不同树种间全P含量差异不显著,说明研究样地间成土母质差异不大,本研究中,土壤P含量(0.27~0.44 g·kg^{-1})明显低于全球水平的2.8 g·kg^{-1}[31],土壤P含量较为匮乏。不同树种人工林土壤表层有机碳、全N含量显著高于对照组裸地,表明努尔苏丹当地人工林的种植能有效提高当地土壤的养分含量。这是由于种植人工林能够防风固沙,减少土壤受到的风力侵蚀作用,提升土壤的保水能力,人工林的生长伴随着凋落物的堆积分解与林下草本植物多样性的提升,也能够促进土壤有机碳、全N含量的增加。

3.2 土壤生态化学计量特征对土壤质量及养分限制的表征作用

土壤C、N、P生态化学计量比不但能作为土壤有机质组成和土壤质量状况以及养分供给能力的重要指标,也可作为土壤C、N、P矿化作用和固持作用的评价指标[32]。土壤C:N是土壤质量的敏感指标,能够衡量土壤碳、氮养分平衡状况,影响着土壤中有机碳和氮的循环[33]。除了白桦林表层土壤C:N

表3 土壤养分含量与生态化学计量比的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between soil nutrient content and ecological stoichiometric ratio

	SOC	TN	TP	TK	C:N	C:P	N:P
SOC	1						
TN	0.966**	1					
TP	0.597**	0.579**	1				
TK	0.386*	0.413*	−0.354	1			
C:N	0.675**	0.477*	0.331	0.192	1		
C:P	0.914**	0.879**	0.239	0.631**	0.663**	1	
N:P	0.821**	0.873**	0.122	0.710**	0.374	0.936**	1

注:SOC表示土壤有机碳,TN表示全氮,TP表示全磷,TK表示全钾;*表示在$P<0.05$水平上显著,**表示在$P<0.01$水平上显著。

为13.5，研究区其他林分类型土壤的C:N均小于全球土壤C:N平均值(13.33)[12]。造林后地上植被的生长和凋落物的转化，使得有机碳、全氮含量增加，而有机碳的增幅较全N大，因此，3个不同人工林土壤C:N均大于对照组裸地。而不同树种、不同土层间土壤C:N变化不显著，这是由于土壤全氮的来源是植物凋落物分解合成的有机质，有机碳和全N作为结构性成分，积累和消耗过程存在相对固定的比值[34]。土壤C:N能够反应土壤有机质的分解速率。有研究表明，土壤有机质分解速率的提高有利于提高P的有效性，而土壤C:N的大小决定着微生物分解有机质的速率[35]。当土壤C:N＞25时，土壤有机质分解较慢，反之则分解较快，本研究样地土壤C:N为10.22~13.5，说明研究区有机质分解较快，有利于P的有效性提高。

土壤C:P可以用来衡量土壤有机碳释放P或者吸收P的潜力，对于土壤P有效性的高低起指示作用[36]。较低的C:P代表着土壤P有效性高，当土壤C:P＜200时，土壤微生物碳含量增加，微生物磷元素发生净矿化作用。研究区土壤C:P为12.88~49.81，不仅小于200更小于全球土壤C:P平均值(72)[37]。研究区3种不同树种人工林土壤表层C:P均显著高于对照组裸地，随着地上植被的增加，土壤有机碳含量不断增加，使得土壤C:P逐渐增大，土壤P有效性逐渐降低。人工林的种植使得研究区域P偏低，但研究区土壤C:P为12.88~49.81，均处于较低水平，P有效性偏低可能不会成为植被恢复过程中限制人工林生长的因子。此外，通过相关性分析也可看出，研究区土壤C:P与土壤有机碳含量呈极显著正相关($P<0.01$)，C:P主要受有机碳含量的影响。

土壤N:P可以用作衡量N饱和的指标，用于确定植物群落N、P养分限制[3]。研究区土壤N:P为1.3~3.69，均小于全球土壤N:P平均值(5.9)。相关分析表明，研究区土壤全N和全P之间呈极显著正相关，而N:P与全P含量关系不显著，与全N呈极显著关系，这说明研究区人工林生长主要受N的限制，N的缺乏是制约当地人工林生长的主要因子，这与曾全超等[38]在黄土高原的研究结果一致。

3.3　努尔苏丹人工林土壤养分与生态化学计量特征之间的相关性分析

由相关性分析结果可见，土壤有机碳、全N与土壤养分含量、生态化学计量特征呈显著正相关。这是由于有机质是土壤养分的主要来源，反映了土壤养分内在的平衡机制，同时也主导着土壤的养分循环[39]。随着人工林的种植，研究区土壤养分含量显著增加，土壤质量得到改善；与此同时土壤P有效性降低，人工林生长可能会受到P有效性限制。土壤全P含量与生态化学计量特征间关系均不显著，原因是土壤P含量稳定，土壤生态化学计量比主要受有机碳、全N影响。3种不同树种人工林土壤生态化学计量间差异不显著，但桦叶槭人工林表层土壤有机碳、全N含量显著高于樟子松人工林，证明不同树种凋落物养分归还量的不同决定了土壤元素含量差异。

4　结 论

通过分析努尔苏丹3种不同树种人工林土壤理化性质和生态化学计量特征及其之间的相关关系，得出如下结论：土壤表层养分含量受植被类型影响较大，针叶林与阔叶林土壤表层有机碳、全N含量差异显著。不同树种间生态化学计量特征差异不显著。努尔苏丹人工林土壤养分含量及生态化学计量特征小于全球平均水平，当地土壤养分仍处于匮乏状态。相关分析表明，N元素是努尔苏丹人工林生长的主要限制因子，土壤N元素的缺乏是影响努尔苏丹人工林养分循环的重要因素。建议在人工林生长过程中适当施氮肥，可提高土壤肥力，加快人工林的生长及生态恢复进程。

参考文献(References)：

[1] 刘蓉, 张卫国, 江小雷, 等. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 96-103. [Liu Rong, Zhang Weiguo, Jiang Xiaolei, et al. Study on the characteristics of degradation succession of *Elymus nutans* community and its correlation to soil properties[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(10): 96-103.]

[2] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 17-23. [Pang Shengjiang, Zhang Pei, Jia Hongyan, et al. Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in Northwest Guangxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 17-23.]

[3] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682. [Zhu Qiulian, Xing Xiaoyi, Zhang Hong, et al. Soil ecological stoichiom-

etry under different vegetation area on loess hillygully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674–4682.]

[4] Han Wenxuan, Fang Jingyun, Guo Dali, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377–385.

[5] He Jinsheng, Fang Jingyun, Wang Zhiheng, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China[J]. Oecologia, 2006, 149(1): 115–122.

[6] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64–71. [Liu Xingzhao, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64–71.]

[7] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58–63. [Wu Tonggui, Chen Bufeng, Xiao Yihua, et al. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 58–63.]

[8] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化[J]. 植物学报, 2014, 49(5): 560–568. [Zhao Yafang, Xu Fuli, Wang Weiling, et al. Seasonal variation in contents of C, N and P and stoichiometry characteristics in fine roots, stems and needles of *Larix principis-rupprechti*[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2014, 49(5): 560–568.]

[9] Cao Yang, Chen Yunming. Ecosystem C: N: P stoichiometry and carbon storage in plantations and a secondary forest on the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2017, 105: 125–132.

[10] 安静, 王文杰, 王洪岩, 等. 人工林和农田对东北地区土壤碳、氮含量及相关指标垂直分布的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(3): 331–338. [An Jing, Wang Wenjie, Wang Hongyan, et al. Effect of forest and farm on vertical patterns of soil carbon, nitrogen and other parameters in Northeast China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(3): 331–338.]

[11] 牛瑞龙, 高星, 徐福利, 等. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7384–7392. [Niu Ruilong, Gao Xing, Xu Fuli, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of soil and leaves from young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* growing in a Qinling Mountain plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7384–7392.]

[12] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937–3947.]

[13] Achat D L, Bakker M R, Augusto L, et al. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: Effects of microbiological and physicochemical properties[J]. Biogeosciences, 2013, 10(121): 733–752.

[14] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947–954. [Yu Yuefeng, Peng Wanxia, Song Tongqing, et al. Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between Karst hills, southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 947–954.]

[15] 李茜. 子午岭林区不同天然次生林生态系统C、N、P化学计量特征及其季节变化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Li Qian. C, N, P Stoichiometry and Seasonal Variation of Different Natural Secondary Forest Ecosystem in Ziwuling Forest Area[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[16] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)叶片养分的空间分布格局[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1899–1906. [Ren Shujie, Yu Guirui, Tao Bo, et al. Spatial patterns for variations in leaf nutrient contents of Dahurian Larch (*Larix gmelinii* Rupr.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1899–1906.]

[17] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(30): 11001–11006.

[18] Lars O. Hedin. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 10849–10850.

[19] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870–879. [Zeng Quanchao, Li Xin, Dong Yanghong, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870–879.]

[20] 杨慧, 涂春艳, 李青芳, 等. 岩溶区次生林地不同地貌部位土壤C、N、P化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2015, 46(5): 777–781. [Yang Hui, Tu Chunyan, Li Qingfang, et al. Analysis of C, N and P stoichiometry of secondary forest in different landforms in Karst area[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(5): 777–781.]

[21] 李路, 常亚鹏, 许仲林. 天山雪岭云杉林土壤CNP化学计量特征随水热梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8139–8148. [Li Lu, Chang Yapeng, Xu Zhonglin. Stoichiometric characteristics of *Picea schrenkiana* forests with a hydrothermal gradient and their correlation with soil physicochemical factors on Tianshan Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 8139–8148.]

[22] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628–1637. [Cheng Bin, Zhao Yongjun, Zhang Wenguang, et al. The research advances and prospect of ecological stoichiometry[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1628–1637.]

[23] 徐满厚, 薛娴. 气候变暖对高寒地区植物生长与物候影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 137–141. [Xu Manhou, Xue Xian. Analysis on the effects of climate warming on growth and phenology of alpine plants[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 137–141.]

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2008. [Bao Shidan. Study of Analysis of Soil and Agrochemistry [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricuture Press, 2008.]

[25] 马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1916-1920. [Ma Qiang, Yu Wantai, Zhao Shaohua, et al. Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1916-1920.]

[26] 张泰东, 王传宽, 张全智. 帽儿山5种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3135-3143. [Zhang Taidong, Wang Chuankuan, Zhang Quanzhi. Vertical variation in stoichiometric relationships of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in the Maoershan region, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3135-3143.]

[27] 王薪琪, 王传宽, 韩轶. 树种对土壤有机碳密度的影响: 5种温带树种同质园试验[J]. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1033-1043. [Wang Xinqi, Wang Chuankuan, Han Yi. Effects of tree species on soil organic carbon density: A common garden experiment of five temperate tree species[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(11): 1033-1043.]

[28] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 818-825. [Zhang Xiangru, Ma Lusha, Chen Yanan, et al. Ecological stoichiometry characteristics of *Robinia preudoacacia* forest soil in different latitudes of Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (4): 818-825.]

[29] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612. [Wei Xiaorong, Shao Mingan. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 603-612.]

[30] Joseph, Mitchell, Craine, et al. Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils[J]. Plant & Soil, 2010, 334(1-2): 73-84.

[31] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673. [Ren Shujie, Yu Guirui, Tao Bo, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC[J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2665-2673.]

[32] 赵海燕, 张剑, 刘冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 618-626. [Zhao Haiyan, Zhang Jian, Liu Dong, et al. Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 618-626.]

[33] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1407-1414. [Zhang Chunhua, Wang Zongming, Ju Weimin, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt[J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1407-1414.]

[34] 秦瑞敏, 温静, 张世雄, 等. 模拟增温对青藏高原高寒草甸土壤C、N、P化学计量特征的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 908-916. [Qin Ruimin, Wen Jing, Zhang Shixiong, et al. Impacts of simulated warming on C, N, and P stoichiometric characteristics of alpine meadow soil in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 908-916.]

[35] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8. [Cao Juan, Yan Wende, Xiang Wenhua, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese Fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 1-8.]

[36] 朱平宗, 张光辉, 杨文利, 等. 红壤区林地浅沟不同植被类型土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 60-65. [Zhu Pingzong, Zhang Guanghui, Yang Wenli, et al. Characteristics of soil ecological stoichiometry of different vegetation types in ephemeral gully of forestland in red soil region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 60-65.]

[37] Cory C. Cleveland, Daniel Liptzin. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.

[38] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891. [Zeng Quanchao, Li Xin, Dong Yanghong, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe Watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1881-1891.]

[39] 董廷发. 不同海拔云南松林土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 672-679. [Dong Tingfa. Soil nutrients and their ecological stoichiometry of *Pinus yunnanensis* forest along an elevation gradient[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 672-679.]

Characteristics of soil ecological stoichiometry of different tree spcies in sub-frigid desert steppe

LOU Boyuan[1,2,3], WANG Yongdong[1,3], YAN Jinsheng[1,2,3], Akida Askar[1,2,3]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: In order to explore the effects of different tree spices on soil nutrients and ecological stoichiometry in sub- frigid desert steppe, combining the method of field investigation and indoor analysis, we analyzed soil nutrients (C、N、P、K) and ecological stochiometry of soil for Nursultan, capital of Kazakhstan of three different tree spcies. The results shouwd that: (1) Soil nutrient content was affected by tree species, but there was no significant difference in ecological stoichiometry among different tree species. (2) Soil organic carbon and total nitrogen contents in different tree species plantations increased significantly after plantation. The differences of soil surface organic carbon and total N contents between coniferous forest and broad-leaved forest were significant. (3) Soil C, N and P contents showed extremely significant positive correlation, and C content was the controlling factor of C: N and C:P, while N content was the controlling factor of N:P. Although the soil nutrient content increased significantly, the overall level was still lower than the global average level, and the local soil nutrient content was still in a state of shortage. N is the limiting factor of nutrient cycle and plant growth in this area. Appropriate application of nitrogen fertilizer in the growth process of plantation can accelerate the growth and ecological restoration process of shelterbelt. This study can provide scientific basis for the protection forest construction and sustainable management in Nursultan, capital of Kazakhstan.

Keywords: soil; desert steppe; characteristics of ecological stoichiometry; soil nutrient; Kazakhstan